

· 光学设计 ·

## 大功率光纤激光器相干组束的研究

彭 辉

(长春师范学院, 吉林 长春 130032)

**摘 要:**随着光纤激光器的激光输出功率及光束质量的不断提高,大功率光纤激光器的应用领域不断拓展。组束技术是提高光纤激光器输出功率的有效方法。分析了非相干组束和相干组束的理论,并进行数值仿真。综述相干组束技术的最新发展,对光纤激光器相干组束的研究具有参考价值。

**关键词:**光纤激光器;相干组束;高功率

中图分类号:TN248.1;O436.1

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2011)02-0027-04

## Coherent Beam Combining Technology of High Power Fiber Laser

PENG Hui

(Changchun Normal University, Changchun 130032, China)

**Abstract:** With the increase of output power and beam quality of fiber laser, the applications of high power fiber laser continue to expand. The beam combining technology is an effective way for increasing the output power of fiber laser. The theories of non-coherent beam combination and coherent beam combination are analyzed, and the numerical simulation is done. The new progress of coherent beam combination is summarized, which offers the reference to the coherent beam combination of fiber laser.

**Key words:** fiber laser; coherent beam combination; high power

光纤激光器是指应用以光纤为基质掺入某些激活离子作为工作物质或利用光纤自身的非线性效应制成的一类激光器,相对于传统固体激光器,光纤激光器由于具有如下优点:如结构紧凑、效率高、光束质量高及散热性好<sup>[1]</sup>,因而得到了国内学者的广泛关注。光纤激光器<sup>[2]</sup>在光纤通信、传感遥测、工业精密加工、医疗、军事、航空技术等领域应用日益广泛。在许多应用中,如引力波传感器、自由空间无线光通信、测距、激光雷达、非线性频率转换等需要高功率单频单纵模高质量激光源。尤其在精密加工领域,高功率高质量激光作为新的能量形式,将发挥不可替代的作用。例如新型半导体集成电路、光电子集成光路的进展离不开高功率高质量激光源。

目前单模光纤激光器实现了千瓦量级的高功

率激光输出<sup>[3]</sup>,且具有衍射受限的光束质量。单个单频光纤激光器由于受到受激布里渊散射的限制,输出功率有限,相应的合成技术成为关键。因此对单频高功率光纤激光器及其相干合成技术的研究,是实现高功率高质量激光的一条很好的途径。

### 1 组束理论

通过将各个光纤激光器直接通过光纤组束,有可能实现提高输出功率的目的。如果所有的光纤激光器阵列的每个单元工作在同样的波长,且都相位锁定,则它们的场在远场是相干叠加的。这种情形称为光纤激光器阵列的相干合束。如果不是这种情形,称为光纤激光器阵列非相干合束<sup>[4]</sup>。以方

形光纤激光器为例讨论合束理论。图1中,相邻光纤激光器阵列单元间距均为 $d$ ,每个光纤激光器阵列单元光纤的束腰宽度为 $w_0$ , $N$ 为光纤激光器阵列的方阵形一行或一列的阵元个数。令 $x_{mn}=m \times d, y_{mn}=n \times d$ ;若坐标 $(x_{mn}, y_{mn})$ 表示光纤阵列单元的中心坐标,均为整数;假设光纤激光器的每个单元发射均为高斯光束,设 $A_{mn}$ 为 $(x_{mn}, y_{mn})$ 的单元发射光束的幅度,而 $\varphi_{mn}$ 为 $(x_{mn}, y_{mn})$ 的单元发射光束的初始相位。则对于坐标点为 $(x_{mn}, y_{mn})$ 的单元,其高斯光束可表示为

$$E_{mn}(x, y, z=0) = A_{mn} \exp\left[-\frac{(x-x_{mn})^2 - (y-y_{mn})^2}{w_0^2} + i\phi_{mn}\right] \quad (1)$$

$$E_{mn}(x, y, z) = A_{mn} \frac{w_0}{w(z)} \exp\left[-\frac{(x-x_{mn})^2 - (y-y_{mn})^2}{w^2(z)} + i\phi_{mn}\right] \exp\left[-i\frac{k(x-x_{mn})^2 - (y-y_{mn})^2}{2R(z)} - i\phi_{mn}\right] \quad (2)$$

式(2)描述了离开光纤起始端面的光功率分布。在式(2)中, $w(z) = w_0 \sqrt{1 + (z/z_0)^2}$ ;  $R(z) = z_0(z/z_0 + z_0/z)$ ;  $z_0 = \pi w_0^2/\lambda$ 。

非相干合束情形时,合束的强度可以写为

$$I(x, y, z) = \sum_m \sum_n E_{mn}(x, y, z) E_{mn}^*(x, y, z) \quad (3)$$

相干合束的情况下,光纤芯芯之间的分布如图1所示,芯内的高斯光束分布同式(1),纤芯内的光功率分布如式(2)所示,相干合束的光强度计算公式为

$$I(x, y, z) = E(x, y, z) E^*(x, y, z) \quad (4)$$

式中, $E(x, y, z) = \sum_m \sum_n E_{mn}(x, y, z) E_{mn}^*(x, y, z)$ 。

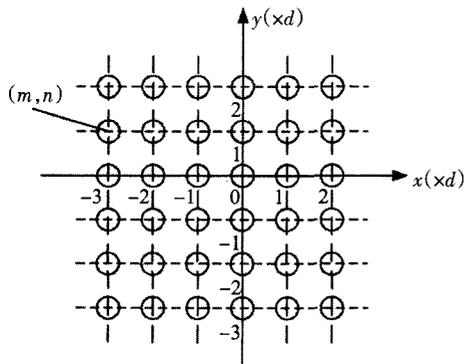


图1 光纤激光器阵列的方阵形分布示意图

根据以上推导的公式,对 $5 \times 5$ 的多芯光纤构成

的合束光进行了数值分析,仿真参数如下:波长为 $1.064 \mu\text{m}$ ,初始相位为0,初始幅度归一化;光束为高斯光束;其束腰为 $4.5 \times 10^{-5} \text{ m}$ 。图2为非相干组束的情况,图3为相干组束的情况,从图2和图3可以看出,相干组束的光束质量高。

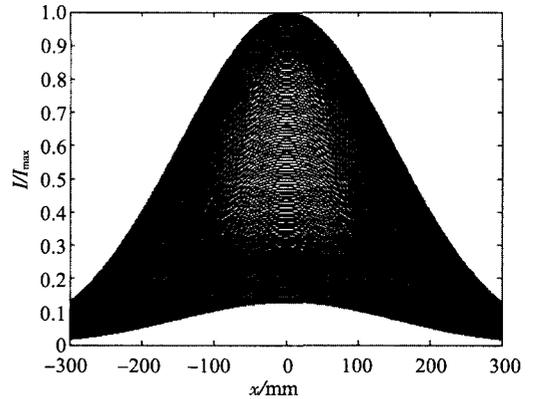
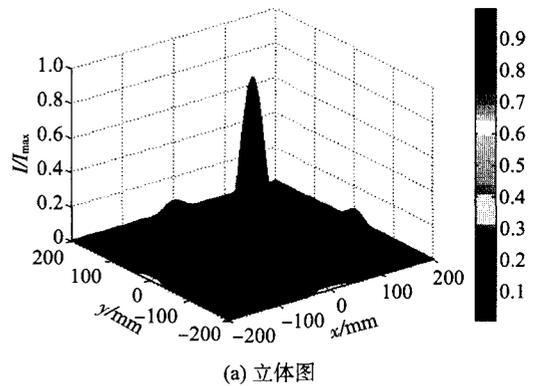
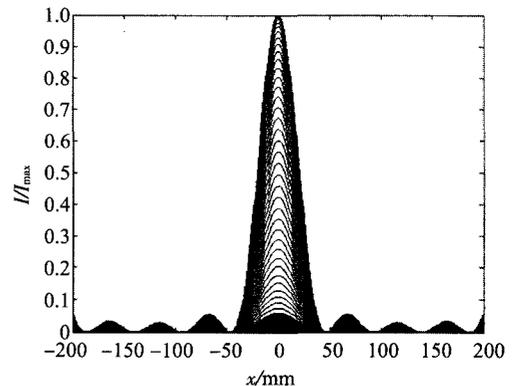


图2 非相干合束的 $z=30 \text{ m}$ 平面归一化强度空间 $x$ 轴侧面图



(a) 立体图



(b)  $x$ 轴侧面图

图3 方阵形分布的光纤激光器阵列相干合束的 $z=30 \text{ m}$ 平面归一化强度空间分布图

## 2 激光组束的进展

道了3个独立激光器锁定相干输出<sup>[5]</sup>,激光器之间的耦合采用成熟的耦合器技术,增益介质采用5 m掺铒光纤,激光腔一端采用90%以上反射率的光纤光栅做反射镜,另一端接一个1×3的耦合器,3个光纤激光器通过耦合器5%的分光臂互相注入,激光输出臂的耦合器分光比为90%,相干合束后条纹清晰度65%,激光器相位较好的互相锁定。输出合束采用了分离的透镜汇聚。本实验采用的激光器功率较低,只有几十毫瓦量级。

Fotiadi Andrei A. 2009年在Opt. Lett报道了通过改变掺铒光纤折射率来对掺铒光纤放大器相干组束的技术<sup>[6]</sup>。采用980 nm光泵浦,引起在1.55 μm处掺铒光纤折射率改变,实现主动相位控制。正向传输反馈环路算法采用基于粒子数反转的双能级系统。利用120 mW激光泵浦控制相位,2个500 mW掺铒光纤放大器成功地相干组束。可以抵抗 $\pi$  rad范围内的声相位噪声以及 $2.6\pi$  rad/s的变化率,潜在的可以用到50个这样的放大器组束工作。

Madasamy P. 2009年在Selected Topics in Quantum Electronics提出采用双体光栅的方法对多束光纤激光器进行组束<sup>[7]</sup>。Combination对多个高功率光纤激光器组束,并且可以维持近衍射极限的光束质量。与单个体光栅作为角度色散元件不同的是,2个体光栅平行放置成一个菱形结构,这种双体光栅组束比一般光束组束的优点是可以放宽对激光线宽的限制。文中报道了线宽0.15 nm,功率为115 W的2个光纤激光器的组束,组束后光束功率为190 W,  $M^2$ 因子为1.18,接近衍射极限。

Moti Fridman 2010年报道将25个光纤激光器组成的5×5阵列进行相位锁定<sup>[8]</sup>。对于多个激光器进行相位锁定,要求这些激光器至少有一个公共的纵模,但由于光纤激光器的长度无法精确控制,所以多个激光器有共同的纵模这个条件一般很难满足,尤其是随着激光器数量的增多,它们拥有共同纵模的可能性大大降低。文中进行了较为详尽的理论分析与仿真,所提到的方法可以将多达25个光纤激光器成功进行相位锁定。实验中所用到的关键元件为5×5的耦合器阵列,通过控制阵列中的不同点相关性,可以达到相位锁定的目的。

2010年中国科学技术大学的高昆等人通过合束技术得到平顶的激光输出<sup>[9]</sup>,激光器按六边形阵列排布,为了得到较宽的平顶激光强度分布,他们

通过运用最小平方理论最优化了每个激光器的激光信号强度和相位。对13个激光器的仿真结果显示,平坦区域的平整度小于1%,并且能量主要集中在中心区域。这种方法不需要额外的光束整形器件,促进了大功率激光器的合束技术的发展。

北京交通大学宁提纲教授带领的团队也对大功率光纤激光器及其组束进行了研究,在他们的发明专利中<sup>[10]</sup>,提出了一个全新的产生高亮度高光束因子的光纤激光器的方案,发明公开了一种单模有源光纤伴生耦合多模有源光纤超亮度单模激光器,已实现超亮度单模激光输出。泵浦源通过端面泵浦或侧面泵浦,在单模有源掺稀土纤芯中产生单模激光,由于单模有源掺稀土纤芯与多模有源掺稀土纤芯之间的伴生耦合,使得这种结构能通过多模纤芯实现单模激光超亮度大功率输出。

### 3 结 论

详细分析了大功率激光器相干组束与非相干组束的理论,并对方形排布的高斯光输出光纤激光器阵列的相干与非相干组束进行了仿真,结果表明,相干组束的光束质量 $M^2$ 因子最好,能量集中程度最高,对于通过组束方法获得高功率激光输出有着指导性理论意义。对光纤激光器大功率组束的最新发展做了综述,并指出了大功率激光器的发展方向。

### 参考文献

- [1] 胡旭东, 宁提纲, 陈青艳. 高功率光纤激光器端面反射系数快速优化算法[J]. 中国激光, 2009, 36(11): 2827-2831.
- [2] 宁提纲, 裴丽, 胡旭东, 等. 单偏振双波长非保偏有源掺杂光纤激光器[J]. 中国激光, 2008, 35(12): 1868-1871.
- [3] Jeong Y, Sahu J, Payne D, et al. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power[J]. Opt. Express, 2004, 12(25): 6088-6092.
- [4] Li Yongzhong, Qian Liejia, Lu Daquan, et al. Coherent and incoherent combining of fiber array with hexagonal ring distribution[J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(5): 957-963.
- [5] Chen Zilun, Hou Jing, Zhou Pu, et al. Mutual injection locking and coherent combining of three individual fiber lasers[J]. Optics Communications, 2009, 282(1): 60-63.

- [6] Fotiadi Andrei A, Zakharov Nikita, Antipov Oleg L, et al. All-fiber coherent combining of Er-doped amplifiers through refractive index control in Yb-doped fibers [J]. Opt. Lett., 2009, 34(22): 3574-3576.
- [7] Madasamy P, Jander D R, Brooks C D, et al. Dual-Grating Spectral Beam Combination of High-Power Fiber Lasers[J]. Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of, 2009, 15(2): 337-343.
- [8] Moti Fridman. Passive phase locking of 25 fiber lasers[J]. Opt.Lett., 2010.
- [9] Gao, K, L Xu, et al. Flat-top laser beam generated by coherent beam combining of Gaussian lasers[J]. Chin. Opt. Lett., 2010, 8(1): 45-47.
- [10] 宁提纲, 胡旭东, 裴丽, 等. 单模光纤伴生耦合多模光纤超亮度单模激光器 [P]. 中国, ZL200810111817.0, 2009-11-11.

(上接第14页)

矩阵在相差一个三维空间的射影变换下可借由三焦点张量恢复,同时确定图像之间的基本矩阵。图5为直线 $L$ 投射到三幅视图的几何关联。

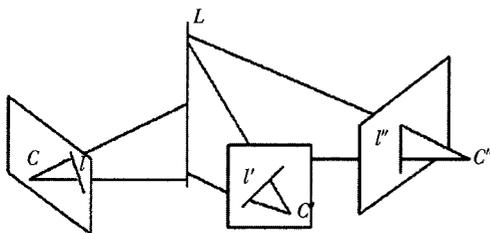


图5 三视图的几何关联

具体流程如下:(1)从序列视图中估计二视图几何然后连接两视图的匹配集,计算跨三幅视图的一组对应特征点。(2)由至少7组非退化的对应关系计算三焦点张量。(3)由三焦点张量恢复基本矩阵。(4)确定两个相机的矩阵后,在相差一个射影矩阵下恢复第三个相机矩阵。(5)可行性误差处理。

在得到三维坐标后,还要进行物体表面的可视化,文中采用Delaunay三角剖分法重建出物体的三维表面。最后通过OpenGL完成纹理映射<sup>[9]</sup>。

### 3 结束语

三维重建技术是计算机视觉、人工智能、虚拟现实、医学图像等前沿领域的热点和难点,也是在基础研究和应用研究中面临的重大挑战之一。文

中对于非特定环境下的三维模型重建提出了一套切实可行的方案并进行了系统的设计,该系统不仅稳定,且操作简单、更加实用,大大提高了自动化的程度。可以通过三幅图像恢复物体的三维形状,该系统在虚拟现实、植物建模等领域具有重要的理论意义和实际应用价值。

### 参考文献

- [1] Linda G Shapiro, George C Stockman. 计算机视觉[M]. 赵清杰, 钱芳, 蔡利栋, 译. 北京:机械工业出版社, 2005.
- [2] 冯宇. 基于计算机立体视觉的三维重建系统研究[D]. 青岛:青岛科技大学, 2009.
- [3] 马颂德, 张正友. 计算机视觉——理论与算法基础[M]. 北京:科学出版社, 1998.
- [4] 陈兵, 吕文阁, 丁少华. 焦点检测技术研究进展[J]. 自动化技术与应用, 2005, 24(5): 1-4.
- [5] David G Lowe. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints [J]. International Journal of Computer Vision (S0920-5691), 2004, 60(2):20.
- [6] 魏冲. 基于数码相机图像的三维重建技术研究[D]. 太原:中北大学, 2009.
- [7] ROTHER C, KOLMOGOROV V, BLAKE A. "Grab Cut"-interactive foreground extraction using iterated Graph Cuts [EB/OL]. (2004-05-20)[2008-01-03].
- [8] Zhang Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11):1330-1334.
- [9] 胡涛. 三维地形技术研究[J]. 光电技术应用, 2007, 22(3):74-78.

### 版权声明

本刊已成为《中国核心期刊(遴选)数据库》、《中文科技期刊数据库》、《中国期刊全文数据库》、《中国学术期刊综合评价数据库》、美国《乌利希期刊指南》、波兰《哥白尼索引》收录期刊,并加入中国光学期刊网,建立了《光电技术应用》期刊网站,所刊载的文章在国内外数据库检索机构及网站(包括纸版、光盘版、网络版)报道时,不再征求作者意见。稿件刊登录用后作者著作权使用费与本刊稿酬一次性付给,并赠送当期样刊两份。